광자쌍의 범프와 새로운 물리의 암시

DOI: 10.3938/PhiT.25.018

이 현 민

Diphoton Bump and Hints for New Physics

Hyun Min LEE

During LHC Run 2 at 13 TeV, both the ATLAS and the CMS collaborations recently observed excesses in the diphoton invariant mass spectrum at 750 GeV. If confirmed, the history of the discovered Higgs boson would repeat, and a plethora of new particles may be revealed in the near future. In this report, we examine the theoretical interpretations of the observed diphoton events by using new physics beyond the Standard Model and then describe the prospects for the diphoton and related physics searches in forthcoming days.

서 론

본래 입자우주론을 전공한 필자는, LHC가 가동하기 시작한 해인 2010년부터 2012년 힉스 입자의 발견을 공표하기 바로 4일 전까지, CERN의 이론그룹에서 박사후 연구원으로 근무하고 있었다. 2012년 7월에 CERN에 있는 LHC의 입자 충돌 실험에서 드디어 힉스 입자가 발견되었고, 그 이후에 얻은 많은 데이터를 분석한 결과, 입자의 성질이 표준 모형에서 예측하는 바와 잘 부합하는 것을 알게 되었다. (힉스 입자의 발견과 그에 따른 노벨물리학상의 수여에 대하여 더 자세한 것은 본지의 2012년 11월호, 2013년 12월호를 참고하기 바란다.) 2012년 7월 4일에 필자는 한국의 고등과학원에서 동료들과 가슴을 졸이며 기다리다가 힉스 입자의 발견 소식에 다른 입자물리학자들과 마찬가지로 벅찬 감동에 사로 잡혔던 것이 불과 4년도 채 되지 않았다. 그 현장의 감동을 인터넷을 통해서

저자약력

이현민 교수는 서울대 물리학 박사(2002)로서, Bonn 대학교(2002-2004), DESY 연구소(2004-2006), 카네기멜론 대학교(2006-2008), 맥 메스터 대학교(2008-2009), CERN 이론그룹(2010-2012), 고등과학원(2012-2013) 조교수를 거쳐 현재 중앙대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 2013년 고등과학원 학술상, 그리고 2015년 우수성과 교육부장관상을 수상한 바 있다. (hminlee@cau.ac.kr)

Fig. 1. Computer reconstruction of a real diphoton event observed in ATLAS detector. Credit: ATLAS/CERN.

중계되는 화면으로 전해 보았지만, CERN에서 연구원 생활을 막 끝내고 돌아온 필자로서는 남다른 감회가 있었다.

지난 2015년 12월 15일에 제네바 시간으로 오후 2시에 ATLAS와 CMS는 또 다른 중대한 발표를 위해서 CERN의 강당에 모였고, 힉스 입자가 처음 발견되었던 그 때와 같은 광자쌍의 에너지 분포에서 750 GeV 근처에 통계적으로 무시하지 못할 범프(bump)를 확인하는 순간이었다(그림 1, 그림 2-1, 2-2). 힉스 입자와는 달리 아직 새로운 입자를 발견했다고 명명하기에는 불충분했지만, ATLAS, CMS 각각 99.99%(3.9 시그마), 99.07%(2.6 시그마)의 신뢰도로 광자쌍의 범프가 관측되었다.^[1,2] (발견을 공표하기 위해서는 신뢰도가 99.9999%(5 시그마)에 도달하여야 한다.) LHC가 가동되는 순간부터 줄곧 표준 모형을 넘어서는 새로운 물리법칙과 새로운 입자들을 찾고자 노력했던 입자물리학자들에게는, 힉스 입자의 발견에 비등한 중대한 사건이라고 할 수 있다. 2016년 새해부터 CERN의 신임 소장으로서 취임한 파비올라 지아노티(Fabiola Gianotti)는 새해 인사말에서 “우리는 (750 GeV 근처의 범프에 대해서)

REFERENCES

- [1] ATLAS collaboration, ATLAS-CONF-2015-081.
- [2] CMS collaboration, CMS-PAS-EXO-15-004.

Fig. 2-1. Diphoton invariant mass distribution at ATLAS 13 TeV. Credit: ATLAS/CERN.

Fig. 2-2. Diphoton invariant mass distribution at CMS 13 TeV. Credit: CMS/CERN.

조금 흥분해도 괜찮다”라고 말을 해서,^[3] 전 세계의 입자물리학자들에게 새해의 희망을 전해주기도 했다.

누가 주문했을까?

1936년에 우주선으로부터 전자와 비슷한 성질을 갖는 뮤온 입자가 발견되었을 때, 1944년에 핵자기공명 현상의 발견으로 노벨상을 받았던 미국의 이시도르 라비(Isidor Isaac Rabi) 교수는 “누가 (뮤온을) 주문했나?”라고 말했다고 하는 유명한 일화가 있다. 그 당시에, 뮤온 입자를 히데키 유카와 교수가 강한 핵력을 주는 입자로서 1935년에 제창한 중간자(무 중간자)로 오인하였다가, 뮤온 입자는 강한 핵력과는 아무런 상관이

Fig. 3-1. Significance (or p-value) plot of the diphoton bump at ATLAS. Credit: ATLAS/CERN.

Fig. 3-2. Significance (or p-value) plot of the diphoton bump at CMS. Credit: CMS/CERN.

없고, 전자와 비슷하지만 질량만 200배 정도 무거운 입자라는 것이 판명이 났다. 그러나 뮤온 입자는 제2세대족의 경입자의 일부라는 것이 알려지게 되었고, 그 이후 제3세대족에는 뮤온 입자와 비슷한 성질을 갖는 타우라는 입자도 발견되었다. 또한 뮤온 입자는 W, Z 보손 등 약력의 전달 입자들과 힉스 입자 등의 붕괴 과정 등을 통해서 중요한 역할을 해왔다. LHC나 차세대 입자가속기 실험에서도 뮤온 입자는 새로운 입자의 존재를 밝혀내는데 여전히 중요한 역할을 할 것으로 기대하고 있다.

지난 12월에 LHC에서 발견된 광자쌍의 범프의 경우에도,

REFERENCES

- [3] F. Gianotti, talk to CERN staff, January 18th, 2016.

현재로서는 대다수의 입자물리학자들이 표준모형을 넘어서는 새로운 물리를 고려할 때 예측하는 종류의 입자와는 거리가 있는 것처럼 보인다. 그러나 광자쌍의 범프가 사실인 것으로 밝혀지면, 뮤온 입자의 경우처럼, 다수의 새로운 입자를 동반할 가능성이 존재하며, 입자물리 분야의 일대 혁명을 가져올 수 있는 가능성이 있다. 한편, 지난 3월에는 유럽의 대표적인 입자물리학회인 2016년 모리온 학회에서, ATLAS와 CMS에서 기존의 데이터를 정밀 분석한 결과를 발표하였다. 8 TeV와 13 TeV의 에너지로 얻은 데이터를 합쳐서 분석한 결과, 광자쌍의 범프는 ATLAS, CMS 각 그룹에서 99.99% (3.9 시그마), 99.93% (3.4 시그마)로 약간 향상된 신뢰도를 보였으며 (그림 3-1, 3-2), 특히 두 그룹에서 8 TeV의 에너지로 얻은 데이터에서도 750 GeV에서 비슷한 범프가 존재했었다고 밝혔다.^[4,5] 아직까지 새로운 입자를 발견했다고 확정하기에는 데이터가 부족하고, 다른 곳 보기 효과(Look Elsewhere Effect)를 고려하면, 광자쌍의 범프의 신뢰도는 각기 95.45% (2시그마), 89.04% (1.6시그마)로 떨어진다. 아직까지 750 GeV 이상의 에너지에서 광자쌍의 신호 숫자가 적은 반면, 이는 힉스 입자의 질량을 114 GeV에서 600 GeV 사이의 전 영역에 대해서 실험을 하고 122 GeV에서 127 GeV까지 가능성을 줄인 후에 125 GeV에서 최종적으로 힉스 입자를 발견한 경우와는 대조가 될 수 있다. 그러나 4월 말경부터 LHC Run 2의 충돌 실험으로부터 더 많은 데이터를 수집하여 분석하면 올 여름에는 광자쌍의 범프에 대해서 더 나은 이해를 하리라고 기대하고 있다.

광자쌍의 범프의 기원

2016년 4월 현재, 광자쌍의 범프를 새로운 입자로 설명하려는 300편에 가까운 논문들이 아카이브(arXiv: 온라인 논문 게재 사이트)에 쏟아져 나왔다. 광자쌍의 범프가 새로운 입자의 붕괴에 기인한다고 할 때, 새로운 입자의 많은 후보들이 있지만, 새로운 입자는 다음과 같은 몇 가지의 조건들을 만족하여야 한다.^[6] 우선, 광자쌍은 전기적으로 중성이며 색깔을 띠지 않으므로, 광자쌍이 새로운 입자의 붕괴로부터 생성되었다고 할 때, 새로운 입자는 또한 전기적으로 중성이며 색깔을 띠지 않아야 한다. 두 번째로, 광자는 스핀 1을 가지므로 각운동량 보존과 보즈 통계에 따라서, 스핀 1인 새로운 입자의 붕괴로부터 광자쌍을 생성할 수 없다. 따라서 새로운 입자의 스핀은 0 또는 2이어야 한다. 세 번째로, 13 TeV의 광자쌍의 범프로부터 새로운 입자의 생성 산란 단면적은 10펨토바(femto-barn) 정도로 나타났는데 (참고로, 1 barn은 10^{-24} cm^2 의 면적에 해당된다.), 8 TeV의 에너지에서 얻은 광자쌍의 에너지 분포에서는 비슷한 범프가 발견되지 않았으므로, 광자쌍의 생성 과정은

Fig. 4. Parton distribution functions from NNPDF3.0. Source: Particle Data Group 2015.

8 TeV의 데이터와 양립할 수 있어야 한다. 네 번째로, ATLAS의 경우에는, 새로운 입자의 붕괴율이 큰 경우에, 즉 새로운 입자의 질량인 750 GeV의 6%인 45 GeV, 또는 새로운 입자의 수명이 1.5×10^{-26} 초라고 하면 (참고로 표준 모형에서 탑 쿼크 입자는 5×10^{-25} 초의 수명을 갖고, 힉스 입자의 수명은 1.6×10^{-22} 초이다), 붕괴율이 작은 경우에 비해서 광자의 범프를 더 잘 설명하는 것으로 보인다. (신뢰도로 보았을 때, 새로운 입자의 붕괴율이 큰 경우에 3.9시그마이고, 그렇지 않은 경우는 3.6시그마이다.) 마지막으로, 광자쌍 이외의 데이터에서는 새로운 현상을 발견하지 못했으므로, 새로운 입자가 광자 이외의 표준 모형의 다른 입자들로 붕괴하는 경우는 제한되어 있다.

LHC에서 충돌하는 각 양성자는 글루온, 업 또는 다운 쿼크 등의 파톤(parton)으로 구성되어 있고, 각 파톤이 양성자의 에너지를 차지하는 비율은 파톤 분포 함수(parton distribution function)라고 하는 확률적인 분포로 주어진다 (그림 4). 글루온이 차지하는 파톤 분포 함수가 크므로, 두 개의 글루온이 충돌하는 경우에 무거운 입자를 생성시킬 수 있는 산란 단면적이 제일 큰 것으로 알려져 있다. 새로운 입자와 표준 모형의 입자들 사이의 상호작용에 따라서, 광자쌍의 범프를 업쿼크와 반 업쿼크의 충돌로 해석할 수도 있지만, 13 TeV와 8 TeV의 생성단면적의 비율을 고려해볼 때, 8 TeV의 결과와 부합하기 위해서 두 개의 글루온이 충돌하는 경우가 선호된다.^[6]

REFERENCES

- [4] ATLAS collaboration, ATLAS-CONF-2016-018.
- [5] CMS collaboration, CMS PAS EXO-16-018.
- [6] R. Franceschini, G. F. Giudice, J. F. Kamenik, M. McCullough, A. Pomarol, R. Rattazzi, M. Redi, F. Riva, A. Strumia and R. Torre, JHEP **1603**, 144 (2016).

Fig. 5. Feynman diagram for the diphoton production with loop process. Source: H. M. Lee, 2016.

ATLAS와 CMS의 결과가 발표된 이후로, 현재까지 발표된 300편 정도의 논문들에서, 750 GeV의 무거운 액시온 입자, 힉스와 비슷한 입자, 중간자와 비슷한 무거운 입자, 무거운 중력자 등 다양한 새로운 입자들이 제안되어 왔다.^[6] 반면에, 새로운 입자가 파이온과 같은 가벼운 입자들로 먼저 붕괴하고 여러 개의 광자들이 광자쌍을 흉내낼 수 있으며, 광자쌍의 범프 외에 다른 입자들도 함께 생성되는 경우들도 배제할 수 없다.^[7,8] 따라서, 앞으로 LHC Run 2의 결과에 따라서, 광자쌍의 범프가 확증이 되면, 다양한 입자물리 모형들을 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

전기적으로 중성인 750 GeV의 새로운 입자는 두 개의 글루온의 충돌에 의해서 생성되고 광자쌍으로 붕괴하는 과정은 나무 과정(tree process)으로는 불가능하다. 그러나 양자역학에 따르면, 기본적인 전하 보존만 만족하는 한 무거운 입자들은 짧은 시간에 쌍생성되었다가 소멸될 수 있으므로, 750 GeV의 새로운 입자는 양자역학적인 고리 과정(loop process)에 따라서 생성되고 소멸되어야 한다(그림 5). 따라서 750 GeV의 새로운 입자는 글루온과 결합하는 색깔을 띤 새로운 무거운 입자들을 통해서 생성되어야 하고, 전하를 띤 새로운 무거운 입자들과 결합하여 광자쌍으로 붕괴되어야 한다.^[6,9-11] 광자쌍의 범프를 생성하기 위해서 필요한 생성 단면적을 얻기 위해서, 고리 과정에 참여하는 전하를 띤 새로운 입자들이 그리 무겁지 않고 750 GeV 입자와 강하게 결합해야 한다. 따라서 750 GeV의 입자의 존재가 확정된다면, 이 입자와 강하게 결합하는 전하를 띤 새로운 입자들도 함께 곧 발견될 수 있을 것으로 기대된다.

새로운 물리법칙과 LHC

힉스 입자의 발견으로 표준 모형은 완성이 되었으며 직간접으로 정밀 실험에 의해서 검증되어 왔다. 힉스 입자는 기본적인 스칼라 입자에 가깝고 힉스 입자의 결합력은 10-20%의 오차 안에서 표준 모형의 예측과 부합되는 것으로 보인다. 그

러나 표준 모형에서는 중성미자의 질량을 생성할 수 없으며, 현재 우주의 물질의 80% 이상을 차지하는, 보이지 않는 암흑 물질의 후보가 존재하지 않는다. 물질과 반물질의 대칭성이 어떻게 깨져 있는지, 힉스 입자의 질량은 왜 가벼운지, 우주는 왜 평탄하고 균일한지 등 표준 모형만으로는 설명할 수 있는 이론적인 난제들도 있다. 예를 들어서, 경입자 숫자의 대칭성을 깨는 무거운 중성미자를 도입함으로써 중성미자의 질량을 생성할 수 있고, 탑 쿼크의 초대칭 입자인 스탑 입자를 도입함으로써 힉스 입자의 질량에 주는 큰 양자 요동의 효과를 상쇄하여 힉스 입자의 질량을 가볍게 유지할 수 있다. 따라서 LHC의 전신인 LEP, 미국 페르미연구소의 Tevatron 등 주요 입자 충돌 실험들에서는, 표준 모형의 정밀 실험뿐만 아니라, 표준 모형을 넘어서는 물리에서 예측되는 새로운 물리법칙과 입자들을 밝히기 위해서 노력해왔다.

특히, LHC에서는 7 TeV의 에너지로 시작하여 현재 13 TeV로 에너지와 충돌 횟수를 높이면서, TeV 정도의 질량을 갖는 새로운 입자를 발견할 수 있을 것이라는 기대가 한층 높아지고 있다.

이번에 발견된 광자쌍의 범프가 기존의 이론적인 난제들을 해결하는 과정에서 도입된 새로운 물리법칙과 어떤 관련이 있는지에 대해서 현재 활발한 연구가 진행되고 있다. 예를 들어서, 힉스 입자의 질량의 안정성을 설명하는 초대칭의 경우에는, 표준 모형의 입자와 스핀만 1/2 만큼 차이가 있고 양자수가 같은 초대칭 입자를 요구하는데, 초대칭 입자들 중에서 제일 가벼운 중성 입자는 암흑 물질의 후보이며, 힉스와 비슷한 스칼라 입자들은 광자쌍의 범프를 줄 수 있는 후보가 된다. 그러나 광자쌍의 범프를 설명하기 위해서 힉스와 비슷한 스칼라 입자와 상호작용하는 전하를 띤 새로운 입자를 도입하여야 한다.^[12-14] 반면에, 왜곡된 여분 차원에 의해서 힉스 입자의 질량을 설명하는 랜달-선드럼 모형^[15]에서는, 여분 차원의 무거운

REFERENCES

- [7] P. Agrawal, Jili Fan, B. Heidenreich, M. Reece and M. Strassler, arXiv:1512.05775 [hep-ph].
- [8] W. S. Cho, D. Kim, K. C. Kong, S. H. Lim, K. T. Matchev, J. C. Park and M. Park, arXiv: 1512.06824 [hep-ph].
- [9] J. Ellis, Sebastian A. R. Ellis, Jeremie Quevillion, Veronica Sanz and Tevong You, arXiv:1512.05327 [hep-ph].
- [10] T. Higaki, K. S. Jeong, N. Kitayama and F. Takahashi, Phys. Lett. B **755**, 13 (2016).
- [11] J. E. Kim, Phys. Lett. B **755**, 190 (2016).
- [12] A. Angelescu, A. Djouadi and G. Moreau, Phys. Lett. B **756**, 126 (2016).
- [13] L. Hall and K. Harigaya and Y. Nomura, JHEP **1603**, 017 (2016).
- [14] H. P. Nilles and M. Winkler, arXiv: 1604.03598.
- [15] L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. **83**, 3370 (1999).

중력자가 4차원 중력과 같이 표준 모형의 입자들과 보편적인 상호작용을 하므로, 전하를 띤 새로운 입자를 도입할 필요없이 광자쌍의 범프를 설명할 수 있다.^[16-19]

따라서 앞으로 LHC Run 2에서 얻을 데이터를 통해서, 광자쌍의 범프를 확증하고 새로운 입자의 스핀을 결정하여 광자쌍의 기원을 규명하는 것이 중요하다. 예를 들어서, LHC에서 글루온의 충돌로 750 GeV의 새로운 입자가 생성된다고 했을 때, 스핀이 0인 새로운 입자의 경우와 달리, 스핀이 2인 새로운 입자는 편광 상태를 갖게 된다. 따라서 무거운 중력자와 같이 스핀이 2인 입자가 광자쌍으로 붕괴한다면, 그 입자가 붕괴하는 각도에 따라서 광자쌍의 분포가 다르게 나타날 것이다.^[16,20]

마지막으로, ATLAS의 데이터에 의해서 선호되듯이, 750 GeV의 새로운 입자가 붕괴율이 높다는 것이 확증된다면, 새로운 입자는 광자쌍뿐만 아니라 표준 모형의 다른 입자쌍으로 붕괴하거나 암흑 물질과 같이 보이지 않는 입자쌍으로 붕괴해야 할 것이다.^[6,16,21] 따라서 여러 가지 다른 붕괴 과정을 통해서 힉스 입자의 존재를 확증하였듯이, 750 GeV의 새로운 입자의 성질을 더 잘 이해함으로써, 기존에 제안된 새로운 물리 법칙과의 관련성을 연구하고 아직까지 고려되지 않은 물리법칙을 탐색하는데 중요한 실마리를 얻을 수 있을 것이다. 광자쌍의 범프는 이론물리학자들이 가능한 이론 세계의 지평선을 넓게 바라보고 새로운 물리법칙과 그에 따른 새로운 입자들에 대해서 연구할 수 있는 계기를 주고 있다.

맺음말

입자물리의 역사는 이론적으로 새로운 입자의 존재를 예측하고 실험적으로 발견하는 역사가 반복되어 왔다고 할 수 있다 (그림 6). 예를 들어서, 1964년에 앙레르(F. Englert), 브라우트(R. Brout), 그리고 힉스(Peter Higgs)에 의해서 힉스 메커니즘이 제안되었고, 1967년에 스티븐 와인버그(Steven Weinberg)에 의해 힉스 메커니즘을 표준 모형의 약력 깨짐에 적용하여

Fig. 6. Years from concept to discovery of particles in the Standard Model. Source: The Economist.

힉스 입자의 존재를 이론적으로 예측하였다. 그 이후 48년 만에 LHC에서 힉스 입자가 발견되었다. 그러나 입자물리의 역사는 무거운 입자와 타우 입자와 같이 이론적으로 예측하지 않은 입자를 “공짜로” 주는 예외를 허용하였다. 최근에 LHC에서 발견된 광자쌍의 범프가 입자물리 역사의 또다른 예외가 될 것인지, 앞으로 발견될 많은 새로운 입자들과 새로운 물리법칙의 단초가 될 것인지 지켜볼 일이다.

REFERENCES

- [16] C. Han, H. M. Lee, V. Sanz and M. Park, Phys. Lett. B **755**, 371 (2016).
- [17] S. B. Giddings and H. Zhang, arXiv:1602.02793.
- [18] A. Falkowski and J. F. Kamenik, arXiv:1603.06980.
- [19] J. L. Hewett and T. G. Rizzo, arXiv:1603.08250.
- [20] H. M. Lee, D. Kim, K. C. Kong and S. C. Park, JHEP **1511**, 150 (2015).
- [21] Y. Mambrini, G. Arcadi and A. Djouadi, Phys. Lett. B **755**, 426 (2016).